青海东北部一次典型冰雹过程的观测分析

王启花[1]， 林春英[1]， 刘 潇[2]， 张莉燕[1]， 赵占秀[3]， 张博越[1]， 龚 静[1]

（1. 青海省气象灾害防御技术中心,青海 西宁 810001；2. 山西省人工增雨防雷技术中心,山西 太原 030032；
3. 海北州气象局,青海 海晏 812200）

摘 要：青海东北部是青海省主要的农作物生产区、也是冰雹高发区和灾害影响的高风险区,冰雹预报预警和人工防雹作业是降低冰雹灾害的重要手段,掌握冰雹发生时各监测资料的变化特征是提高冰雹预报能力、尽早开展人工防雹作业的前提。2021年6月29日青海东北部出现了一次大范围的冰雹天气过程,利用多普勒天气雷达、雨滴谱资料,结合高空和地面常规气象资料,对此次冰雹天气过程进行了分析。结果表明:青海东北部地区高空有冷平流输送,地面增温明显,导致层结不稳定,是产生此次冰雹的天气背景。平安地区降雹阶段平均雨滴谱和速度谱均呈多峰分布,人工观测的平安冰雹最大直径和雨滴谱仪观测的相差不大,说明雨滴谱仪能很好的观测到冰雹粒子,并且能确定最大冰雹出现的时间。雹云发展大致经历了发生、跃增、降雹和消亡等阶段,降雹前低层雷达反射率因子出现明显的"V"字型入流缺口;雹云成熟阶段具有明显的有界弱回波区结构,中低层有明显的偏南气流入流,且此时径向速度图上雹云有明显的"0线","0线"垂直向上,穿过悬垂回波和有界弱回波区域上部,指向冰雹云顶。此次冰雹个例的分析,对青海东北部冰雹预报具有重要的指导意义,冰雹发生前各要素变化特征是后期科学指导防雹作业点适时、适量开展人工防雹作业的重要判据。

关键词：冰雹；雨滴谱特征；回波特征；观测分析；青海东北部

冰雹是一种由对流引起的发展迅速、破坏性强、灾害重的天气过程[1],是灾害防御的重点,也是气象预报预警的难点。青海东北部是青海省主要农作物生产区,多高山、河谷,地形地貌复杂,天气气候特殊[2-3],在该地区山区生成的降雹系统受西北气流影响,随高空风向东南移动,使得该地区多雹中心一般多位于东-西向的山脉的南坡,南-北向的山脉的东坡[4]。每年6—9月是青海省农作物的发育、乳熟、成熟、收割阶段,同时也是冰雹高发期,冰雹对农作物的生长发育、丰收都会造成严重的灾害,目前,青海省由于探测技术有限,冰雹研究主要基于常规气象要素和天气雷达开展,主要研究冰雹过程高空环境条件、雷达特征参量等变化特征,并得到相应的冰雹预报阈值,基于这些要素的冰雹预报准确性和预警时效还需进一步提高。

近年来,随着探测技术和数值模拟水平的提高,国内外学者针对冰雹的形成和发展机理及降雹时各探测资料特征进行了大量研究,并取得了一系列成果。基于地面和探空资料开展的冰雹天气研究表明,中上层干冷、低层暖湿及高层辐散、低层辐合的层结不稳定大气,强的垂直风切变、高空急流、适宜的0 ℃和−20 ℃高度都有利于冰雹产生[5-10];雷达因其较高的时空分辨率,目前广泛应用在冰雹预警和防雹作业指挥中[11],回波悬垂、低层入流缺口、有界弱回波区、三体散射、中层径向辐合风暴顶辐散等都是冰雹出现的典型特征[12-15],也是冰雹预报预警过程中最重要的参考要素,除了这些典型特征外,还有研究利用雷达资料追踪冰雹过程,得出了判别冰雹出现以及可能出现的冰雹的大小的雷达特征参量阈值指标[16-19],并建立了部分地区冰雹天气的概念模型,给出了大雹增长机制[20-23];数值模式因其具有较高的时效性、能模拟冰雹云的微物理机制,目前广泛应用于冰雹预报中,许多学者利用WRF和冰雹云分档模式研究了冰雹的生成和演变

收稿日期：2023-03-24； **修订日期**：2023-11-07
基金项目：青海省科技厅研究项目(2023-ZJ-727);国家自然科学基金项目(42165008);青海省气象局重点科研项目(QXZD2022-12)
作者简介：王启花(1991-),女,工程师,主要从事云降水物理与人工影响天气研究. E-mail: wangqhnuist@sina.com
通讯作者：林春英. E-mail: qhryblin@163.com

过程,研究发现青藏高原东北边缘强天气过程前期最大对流边界层高度增厚,潜热和热感通量明显大于平均情况,边界层摩擦速度在强天气过程发生前后显著增加[24],霰和云水是形成雨水和雹的主要来源[25],雪粒子[26]、过冷水冻结产生的冻滴[27],冰晶撞冻雨滴、霰[28-29]与雨水和云水发生撞冻作用形成雹粒子并不断增长是产生冰雹的主要微物理机制,在冰雹初始形成阶段,小冰雹(D<10 mm)以下的冰雹粒子在位于-50~-20 ℃上升气流减小的辐合区域的增长机制和-10 ℃左右的"穴道"机制同样重要,对于典型冰雹和大冰雹(D>10 mm),"穴道"机制是冰雹增长最重要的机制[29-30];近年来,随着微波辐射计、风廓线雷达、雨滴谱仪等观测设备的引进,可以全天候的监测测站上空整层水汽变化和风场演变特征,降水粒子微结构演变特征[31-33],从而可以掌握强对流天气发生前后各高度层形势场变化、宏微观物理量变化特征、降水粒子属性等。

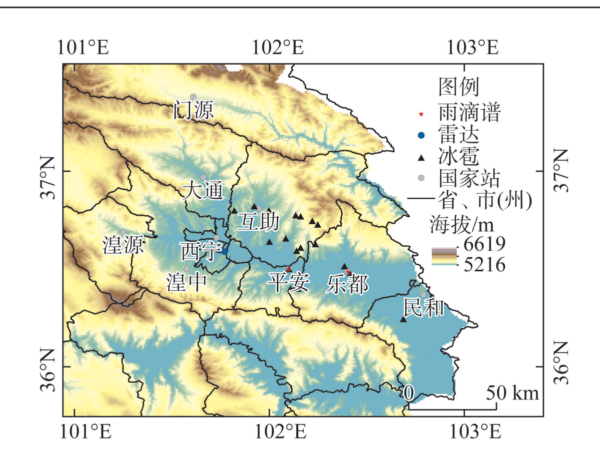
本文利用地面及高空、平安区雨滴谱、西宁多普勒雷达等资料,对2021年6月29日青海东北部冰雹形成原因进行分析;并探讨了雨滴谱仪在冰雹天气监测预警中的应用,为今后冰雹天气的监测预警及相关研究提供参考。

1　资料与方法

本文使用的观测资料是2021年6月29日冰雹信息、MICAPS 4.5高空和地面填图、地面观测站分钟级常规气象要素、08:00 500 hPa高空场资料,西宁C波段多普勒天气雷达资料、平安区DSG1型降水现象仪观测的雨滴谱资料,图1为降雹情况和各类探测仪器分布图。

冰雹开始、结束时间和冰雹最大直径是由地面观测人员提供,冰雹落区由地面观测人员提供和中国气象局灾情直报网获得。

DSG1降水天气现象仪雨滴谱数据采用德国OTT Parsivel激光雨滴谱仪观测[34]。观测的降水粒子谱共有32个尺度和32个速度测量通道,粒子尺



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2017)3320号,对底图边界无修改。下同。

图1　探测仪器分布

Fig. 1　Distribution of detection instruments

度测量范围为0.2~25 mm,速度测量范围为0.2~20 m·s^{-1},采样面积为54 cm^2,采样间隔为1 min[35]。

各尺度通道内雨滴单位尺度空间数密度计算公式为[33]:

$$N(D_i)=\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}}{AtV_j\Delta D_i}$$

式中:n_{ij}为在第i个尺度通道和第j个速度通道的粒子个数;A为雨滴谱仪的采样面积(cm^2);t为采样时间间隔(min);V_j为第j个速度通道的粒子下落速度(m·s^{-1});ΔD_i为第i个尺度通道的宽度(mm)。

2　结果与分析

2.1　降雹情况

2021年6月29日17:00—20:00,青海东北部出现了一次冰雹天气过程,沿冰雹云移动路径,4个县多个乡镇观测到冰雹,并受到不同程度的灾害。乐都下营乡18:20—18:30冰雹最大,最大直径达到20 mm,平安本站18:03—18:11观测到16 mm的冰雹(表1)。此次冰雹强度较强、持续时间长、影响区域广,是青海东北部一次典型的冰雹天气过程。

以平安本站为例,对此次冰雹前后气象要素变化特征进行分析(图2),雹云发展初期以晴好天气

表1　2021年6月29日降雹实况

Tab. 1　The hail event on 29 June 2021

	互助	互助	平安	乐都	民和
降雹时间	17:16—17:24	17:47—17:49	18:03—18:11	18:20—18:30	18:49—18:50
最大冰雹直径/mm	7	4	16	20	-

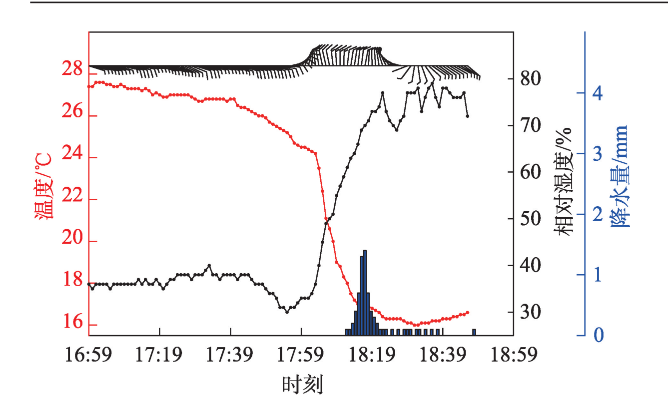


图2 平安站地面1 min气象要素时间分布

Fig. 2 Meteorological elements at 1 min intervals observed at Pingan Station

为主,温度26 ℃以上,地面东南风为主,随着冰雹云入境,温度减小风向开始转变为北风,随后随着18:03降雹开始,18:04地面测站开始观测到降水,温度继续降低,相对湿度开始迅速增大,风向继续为北风。18:12开始,降雹结束,平安站继续由冰雹云控制,此时以降水天气为主,风向继续为北风,由于降水影响,平安站相对湿度继续增大、温度继续降低,18:25左右,冰雹云移出平安站,此后平安站风向开始转变并维持东南风,温度维持不变,相对湿度较大且在一定范围内震荡。

2.2 天气形势分析

2021年6月29日强对流天气过程是受稳定维持的脊前西北气流配合冷温槽影响产生的。08:00 500 hPa(图3a)天气图上,我国西北地区受西北气流控制,新疆北部到甘肃河西地区到青海东北部有一片强风速区(≥16 m·s^{-1}),蒙古国地区有−16 ℃的冷中心,强西北气流不断将冷空气由西北向东南输送至青海东北部;14:00地面图(图3b)显示,青海大部地区处在负变压区中,风场上东部地区倒灌偏东风为主,晴好的天气,使东部地区增温最明显,达

(a) (b) (c) (d)

图3 2021年6月29日08:00 500 hPa高空图(a)、14:00地面图(b)、08:00西宁站T-lnp(c)、08:00西宁站温度-相对湿度随高度变化(d)

Fig. 3 Geopotential height (black solid lines) and temperature (red dashed line) at 500 hPa (a) at 08:00 BT, ground field (b) at 14:00 BT, T-lnp (c) at Xining Station at 08:00 BT, characteristics of temperature-relative varies with altitude (d) at Xining Station at 08:00 BT 29 June 2021

3 ℃。低层增温，高空冷平流，使东部地区层结极不稳定，对午后出现强对流天气提供了良好的动力条件。08:00西宁站T-lnp（图3c）和温度、相对湿度随高度变化图（图3d）显示，从地面到650 hPa有明显的风切变，风随高度顺转，低层湿度条件较好，中高层有明显的冷干层，这种冷暖平流与大尺度分析一致；0 ℃层高度为4705 m，−20 ℃高度则为7730 m，不稳定的层结和适宜的高度有利于此次冰雹天气过程的发生。

此次冰雹天气过程主要是低层增温、高层冷温槽不断输送的冷平流导致的层结不稳定造成的。08:00西宁站探空显示低层有明显的风切变，风随高度顺转、中高层有明显的冷干层，0 ℃层高度为4705 m，−20 ℃高度则为7730 m，不稳定的层结和适宜的高度使得6月29日青海东北部发生了多次冰雹天气。

2.3 雨滴谱

雨滴谱特征参量能体现降水粒子直径、数浓度、降落速度等微物理特征，并且根据降水粒子直径(D)和下落速度(V)的分布，可以判别降水类型。

2.3.1 *雨滴谱时间演变特征*　以18:03—18:11平安本站出现的冰雹天气为例，分析冰雹过程雨滴谱分布特征，由于仪器观测的数据为上一时次的数据，故18:04—18:12雨滴谱观测的降水粒子数据即为降雹时次的数据。图4为平安站降水粒子雨滴谱、速度谱随时间分布图。18:04开始，平安雨滴谱仪观测到降水，此时地面测站亦开始观测到降水（图2）。18:04—18:12降雹期间，粒子数浓度较大、雨滴谱和速度谱宽均较宽，降水粒子大多是直径1~5 mm和速度1~5 m·s^{-1}的小粒子，直径1~5 mm的粒子占总粒子数浓度的89%，速度1~5 m·s^{-1}的粒子占总粒子数浓度的83%，直径>5 mm的粒子占总粒子数浓度的10%，速度>5 m·s^{-1}的粒子占总粒子数浓度的8.6%；雨滴谱峰值出现在18:12，直径为3.5 mm，峰值数浓度达到2053.4 m^{-3}·mm^{-1}，此时，速度谱也出现峰值，速度为3 m·s^{-1}，数浓度达到1661.5 m^{-3}·mm^{-1}。降雹结束后，雨滴谱观测的粒子直径和速度均明显减小，18:16—18:22，降水粒子数浓度在各粒径段均低于100 m^{-3}·mm^{-1}。

2.3.2 *降雹时刻雨滴谱直径、速度分布特征*　雨滴谱直径、速度分布特征可以直接确定降水类型，当V>10 m·s^{-1}，D>5 mm时为冰雹，由图5可以看出，降雹期间，雨滴谱仪观测到了大量的直径>5 mm，下落速度超过10 m·s^{-1}的粒子，即观测到了冰雹。平安本站降雹期间，人工观测冰雹最大直径为16 mm，结合直径和下落速度分布关系（图5），18:06观测到了最大冰雹粒子（图5b），此时观测到的冰雹最大直径为14 mm，降落速度为14 m·s^{-1}，说明雨滴谱仪能很好的观测到冰雹粒子，并且能很好的确定最大冰雹出现的时间，观测到的冰雹最大直径与人工观测的相差较小。

冰雹落地动能的大小直接影响冰雹造成的灾害程度[36]，本文以$V=aD^b$为计算公式，利用最小二乘法拟合，得到降雹过程中粒子速度拟合线（图5），降雹过程中相关系数R^2达到了0.97~0.98，拟合效果较好，a值为4.2~5.2，平均值为4.7，b值为0.52~0.65，平均值为0.59，降雹最强的时刻（18:08）拟合公式为$V=5D^{0.52}$（图5d），与徐家骝[37]的$V=5D^{0.5}$基本一致。

将18:04—18:12降雹阶段和18:13—18:51降雹结束后的降水阶段的平均雨滴谱和速度谱进行对比分析，直观的显示出降雹和降水阶段的雨滴谱和速度谱的差异。从图6可以看出，降雹时，平均雨滴

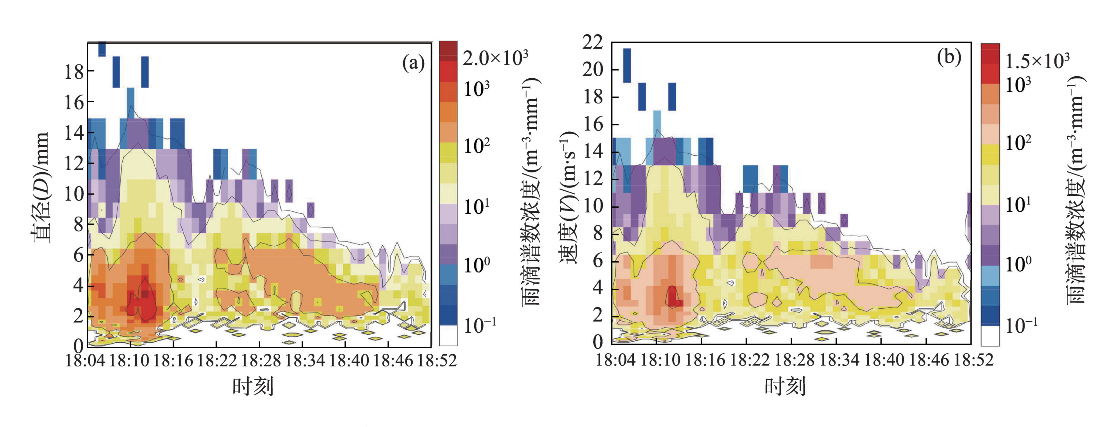


图4　平安站降雹天气过程中雨滴谱(a)、速度谱(b)随时间的演变

Fig. 4　Evolution of raindrop size spectrum (a) and raindrop velocity spectrum (b) during the hailing process at Pingan Station

谱和速度谱均为多峰型，雨滴谱和速度谱均较降雹后宽，雨滴谱数浓度在各粒径和速度范围内均较降雹后明显增大，能明显观测到直径>5 mm、速度>10 m·s^{-1}的冰雹粒子，而降雹后，平均雨滴谱呈单峰、速度谱呈多峰型分布，降水粒子最大直径仅为4.8 mm，未观测到冰雹粒子。

平安冰雹过程雨滴谱分析发现，降雹阶段平均雨滴谱和速度谱均呈多峰分布，降雹阶段雨滴谱仪能明显观测到冰雹粒子，18:06雨滴谱仪观测到了最大冰雹粒子，此时观测到的冰雹最大直径为14 mm，与人工观测的冰雹最大直径16 mm相差较小，说明雨滴谱仪能很好的观测到冰雹粒子，并且能确定最大冰雹出现的时间。

2.4 雷达参量特征

2.4.1 雹云发展阶段雷达参量特征 此次冰雹过程从初生到消亡阶段雷达参量的变化特征如图7所

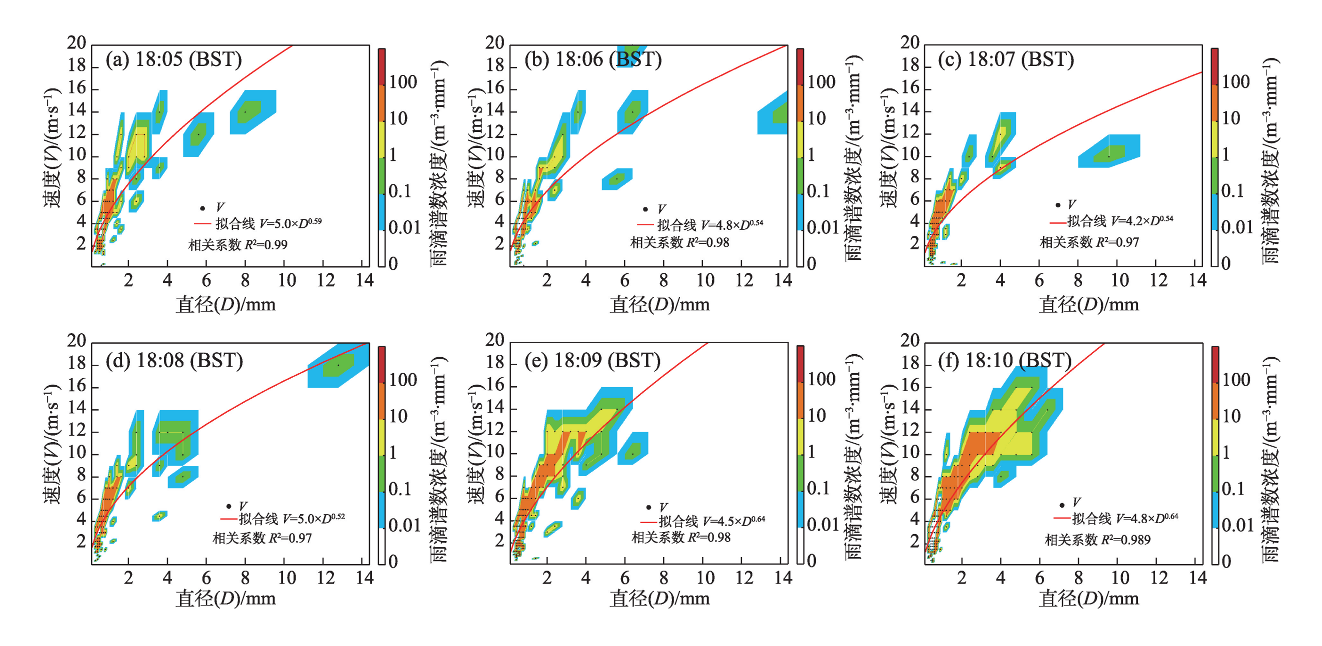


图5 冰雹过程中粒子速度拟合

Fig. 5 Velocity fitting during hailing process

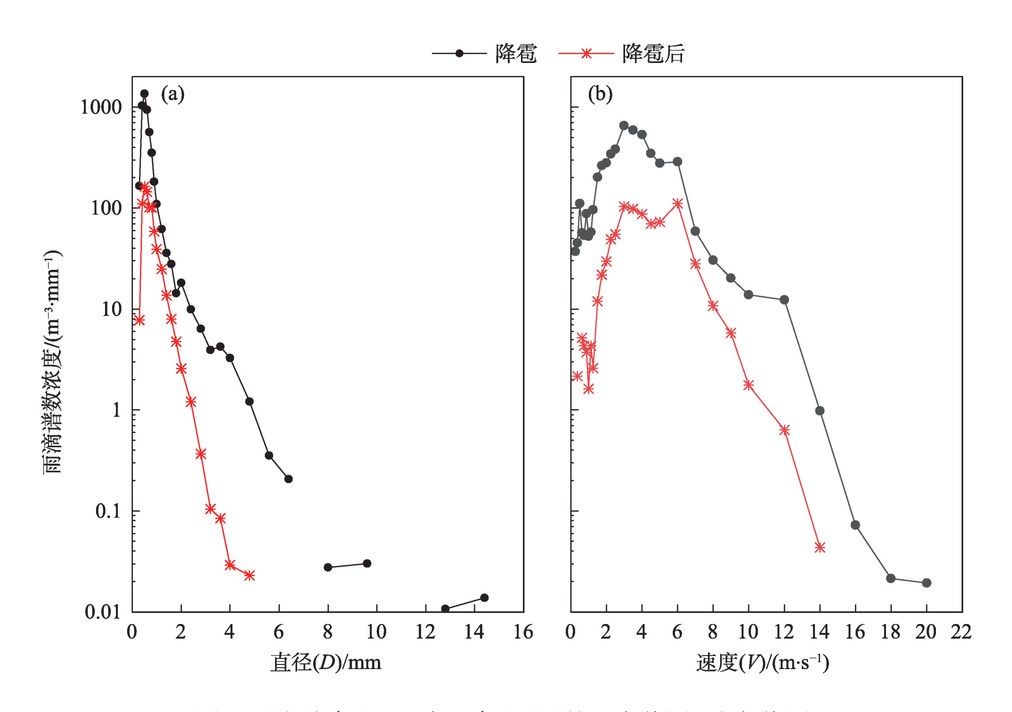


图6 平安站降雹过程中和降雹后平均雨滴谱(a)、速度谱(b)

Fig. 6 Average raindrop size spectrum (a) and velocity spectrum (b) during and after hail at Pingan Station

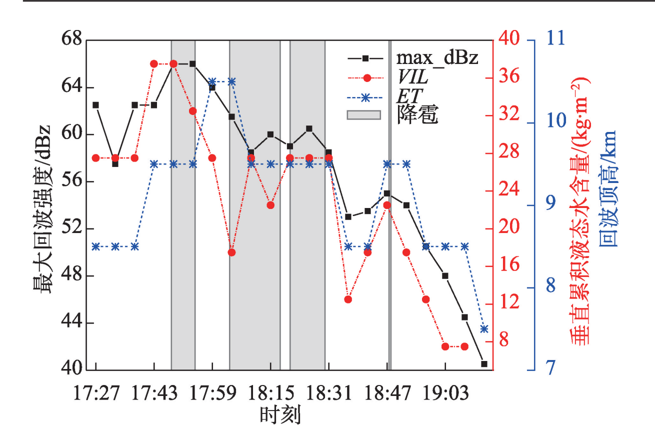
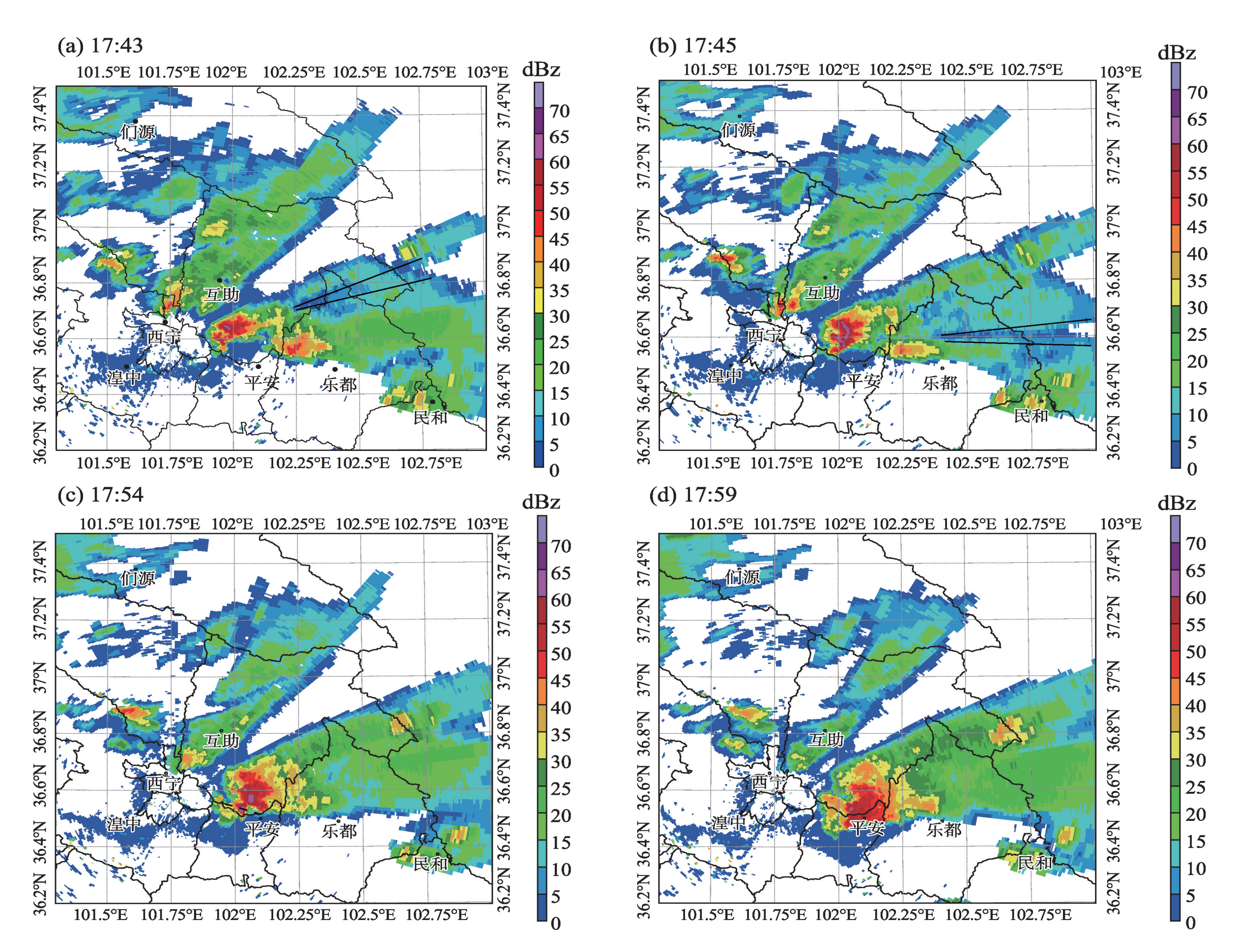


图7　雹云发展阶段最大回波强度、垂直累积液态含水量和回波顶高演变

Fig. 7　Evolution of maximum echo intensity, vertically integrated liquid water and the height of echo top in the development stages of hailstorm

示,16:00左右,在大通境内有对流云团生成,云系不断发展并向东南移动。17:27左右互助境内冰雹云强度较强,雷达最大反射率(max_dBz)达到了62.5 dBz,垂直累积液态水含量(*VIL*)达27.5 kg·m^{-2},回波顶高(*ET*)达8.5 km;随着冰雹云继续发展,17:43冰雹云max_dBz维持62.5 dBz,*VIL*出现跃增达到37.5 kg·m^{-2},*ET*达9.5 km;17:48冰雹云max_dBz达66 dBz,*VIL*和*ET*继续维持,此时互助出现冰雹天气;冰雹结束后,最大回波强度和*VIL*都减小。互助降雹后,冰雹云又继续向东南移动并不断发展,发展沿线平安、乐都、民和出现了不同程度的冰雹天气。可见,冰雹云发展大致经历了发生、跃增、降雹和消亡的阶段:发生阶段相对较短,经过3个体扫时间;跃增阶段,*VIL*快速增大,跃增值为10 kg·m^{-2};降雹阶段回波顶高、*VIL*波动较大,其中,18:03—18:30平安、乐都下营乡降雹后,*ET*由10.5 km下降到8.5 km,max_dBz由62 dBz迅速降至53 dBz,*VIL*由27.5 kg·m^{-2}降至12.5 kg·m^{-2}。

2.4.2　典型时刻雷达参量　利用西宁新一代天气雷达分析此次降雹过程(图8),17:47—18:11互助、平安多次出现冰雹,降雹前冰雹云具有典型的雷达特



注:(a)、(b)中黑线区域为"V"型缺口;(c)中黑虚线为图10中的剖面位置。

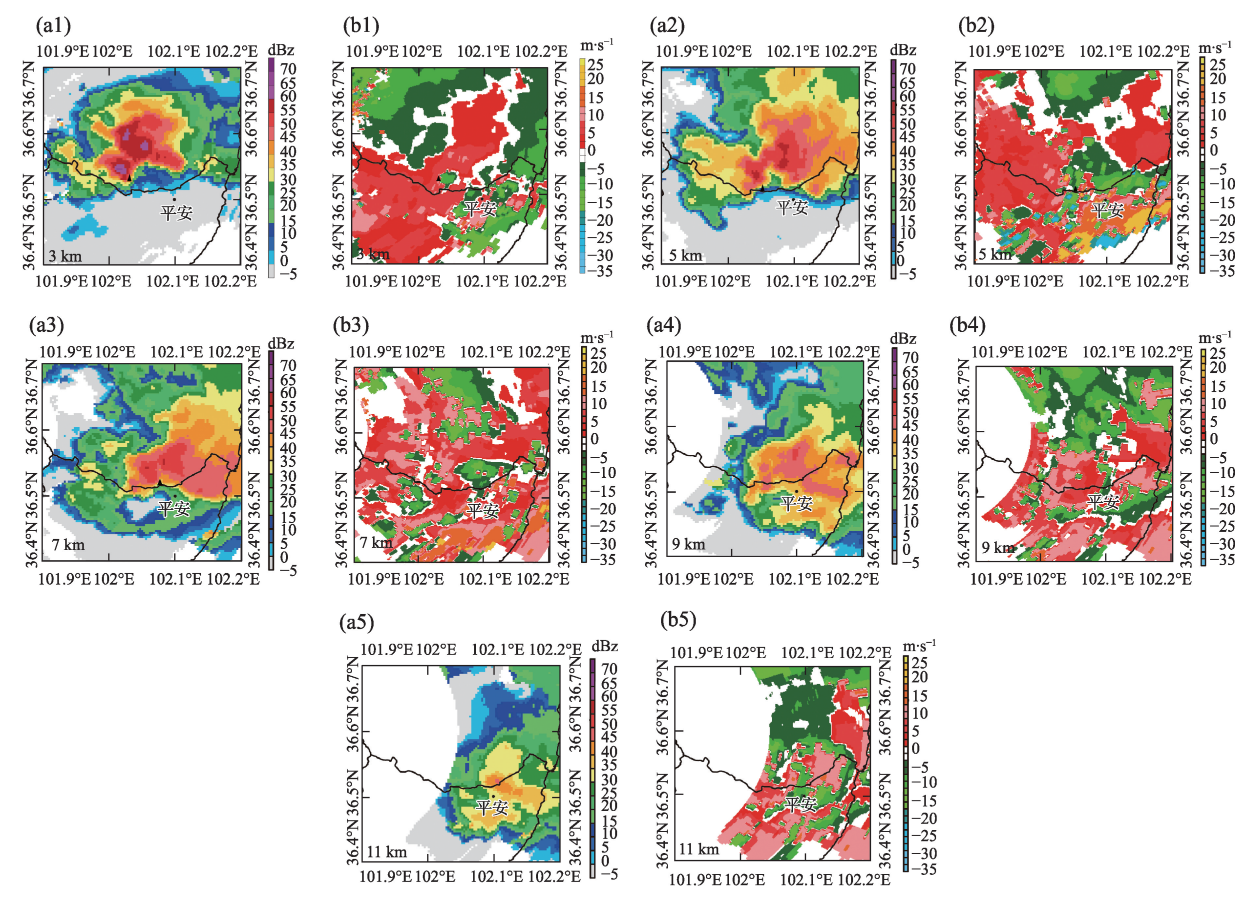
图8　2021年6月29日2.4°仰角基本反射率因子

Fig. 8　Based reflectivity at elevation 2.4° on 29 June 2021

征，且平安降雹时刻，平安站雨滴谱仪观测到了冰雹粒子，因此，为了研究此次冰雹天气过程雷达特征，并与平安站雨滴谱、地面观测资料进行匹配，选取17:42—18:59互助、平安产生冰雹天气前的典型时刻进行分析，17:43冰雹云在互助境内，此时开始低层雷达反射率因子出现明显的“V”字型入流缺口，随后冰雹云不断发展，强度增强，17:47—17:49，在互助境内出现了冰雹天气，17:48低层雷达反射率因子仍然有明显的“V”字型入流缺口，降雹后冰雹云强度依旧较强，但是低层反射率因子观测不到明显的“V”字型入流缺口。

图9是6月29日17:54不同高度雹云的反射率因子、径向速度CAPPI，由图9可见，雹云具有明显的有界弱回波区，且中低层有明显的偏南气流入流。从反射率因子CAPPI图可以看出，3 km和5 km高度，有界弱回波区向东南方向开口，即为上升气流入流区；从1~11 km径向速度CAPPI图上，有界弱回波区中心东侧有朝雷达的负速度区，说明冰雹云移动前方中低层有明显的入流，3 km、5 km高度有界弱回波区中心西部有正速度大值区，正负速度形成气旋性环流，低层为辐合型气旋式旋转，这种低层明显的辐合性旋转对冰雹产生具有很好的指示。

2.4.3 雹云结构及冰雹增长机制 沿图8c冰雹移动路径方向对17:54的雷达反射率因子、径向速度的剖面图进行分析，可以反映冰雹云的垂直结构和气流的辐合、辐散情况。由图10a反射率因子剖面图可以看出，冰雹云具有明显的有界弱回波区和回波墙，冰雹云顶高>12 km，高悬的强回波中心（>60 dBz）已接地。从径向速度剖面图10b可以看出，有界弱回波区对应较强的入流，入流最大风速达20 m·s^{-1}，入流的西南风在中层与偏北气流形成辐合，最强辐合出现在4~7 km高度，随高度增加辐合减弱，且径向速度图上可以看出明显的“0线”，“0线”上水平方向速度为0，但是垂直速度不为0，中层“0

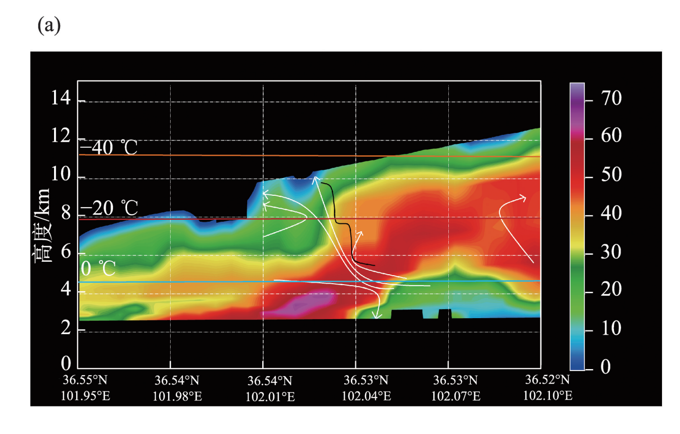


注：(a_1)~(a_5)为3~11 km（间隔2 km）的反射率因子；(b_1)~(b_5)为与(a_1)~(a_5)同高度的径向速度CAPPI。

图9 2021年6月29日17:54不同高度反射率因子（a_1~a_5）和径向速度（b_1~b_5）显示的雹云结构

Fig. 9 The hailstorm structure displayed by CAPPI radar reflectivity (a_1-a_5) and radial velocity (b_1-b_5) at various heights at 17:54 BT 29 June 2021

(a)



(b)

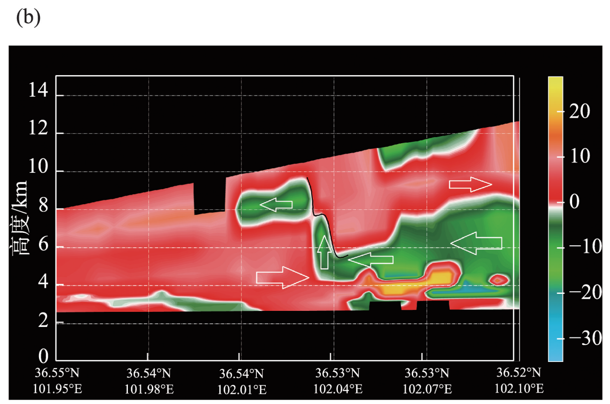


图10 2021年6月29日17:54沿图8c黑虚线的反射率因子(a, 黑线为“0线”)和径向速度(b, 箭头指向气流运动方向)剖面

Fig. 10 Vertical cross sections of radar reflectivity (a, black line is ’0 line’) and radial velocity (b, arrows indicate airflow direction) along black dotted line in Fig. 8c at 17:54 BT 29 June 2021

线”的走向垂直向上,即为主上升气流的方向,从图10还可以看出,“0线”是垂直向上分布,“0线”穿过悬垂回波和有界弱回波区域上部,指向冰雹云顶,这与青藏高原东北边缘冰雹云中的“穴道”冰雹形成和增长结构基本一致[29]。此次过程冰雹粒子主要在−20~0 ℃区域生成并增长。

此次冰雹过程中雹云发展大致经历了发生、跃增、降雹和消亡等阶段,降雹前低层雷达反射率因子出现明显的“V”字型入流缺口。17:54不同高度反射率因子和径向速度CAPPI显示,雹云具有明显的有界弱回波区结构,且中低层有明显的偏南气流入流;雷达反射率因子、径向速度的剖面图上雹云具有明显的有界弱回波区和回波墙,径向速度图上雹云有明显的“0线”,“0线”垂直向上,穿过悬垂回波和有界弱回波区域上部,指向冰雹云顶。

此次典型冰雹过程雨滴谱分布特征与南京六合[38]、宁夏六盘山[33]观测的冰雹的雨滴谱分布特征对比发现,雨滴谱浓度最大的区域青海东北部2~4 mm、速度3~4 $m \cdot s^{-1}$,南京六合0.5~2 mm、速度1 $m \cdot s^{-1}$,降雹阶段青海东北部为多峰型、六合和六盘山均呈指数型减小,速度谱青海东北部为多峰型、六合呈单峰分布、六盘山均呈指数型减小分布。对比不同地区成熟阶段冰雹“0线”分布情况发现,青海东北部为垂直向上的“0线”,山丹诸城为一条倾斜“0线”[21],河北邢台分为上、中、下三段较短的垂直向上的“0线”[20]。

3 结论与讨论

通过分析2021年6月29日青海东北部一次典型冰雹天气过程的地面雨滴谱特征、雷达回波特征及演变情况,得到如下结论:

(1) 青海东北部地区高空有冷平流输送,地面天气晴好,增温明显,使东北部地区层结极不稳定,有利于午后出现强对流天气。

(2) 平安地区降雹期间,粒子数浓度较大、雨滴谱和速度谱宽均较宽,降雹结束后,雨滴谱观测的粒子直径和速度均明显减小。降雹阶段平均雨滴谱和速度谱均呈多峰分布,降雹阶段雨滴谱仪能明显观测到冰雹粒子,并且能很好的确定最大冰雹出现的时间。

(3) 此次冰雹过程中雹云发展大致经历了发生、跃增、降雹和消亡等阶段,降雹前低层雷达反射率因子出现明显的“V”字型入流缺口。雹云成熟阶段具有明显的有界弱回波区结构,且中低层有明显的偏南气流入流,此时,雷达反射率因子、径向速度的剖面图上雹云具有明显的有界弱回波区和回波墙,径向速度图上雹云有明显的“0线”,“0线”垂直向上,穿过悬垂回波和有界弱回波区域上部,指向冰雹云顶。

冰雹形成过程十分复杂,冰雹粒子的形成不仅考虑上升气流,还与云微物理过程中粒子的相态转换有关,本文主要基于C波段天气雷达分析了冰雹天气过程雷达常规特征参量分布特征和冰雹粒子的增长机制,未分析冰雹云不同阶段、不同高度的相态转换特征,今后基于X波段双偏振雷达和其他特种观测设备分析青海东北部冰雹云不同阶段和高度水汽变化特征和粒子相态转换特征。

参考文献(References):

[1] 赵先丽, 李丽光, 贾庆宇, 等. 1988—2007年辽宁主要农业气象灾害分析[J]. 气象与环境学报, 2009, 25(2): 33−37. [Zhao Xianli, Li Liguang, Jia Qingyu, et al. Analysis of main agrometeorological disasters from 1988 to 2007 in Liaoning Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2009, 25(2): 33−37.]

[2] 龚静, 王青川. 青海省东部农业区高炮人工防雹效果评估[J]. 青海科技, 2008, 14(6): 36−39. [Gong Jing, Wang Qingchuan. Evaluation of hail suppression effect of antiaircraft artillery in eastern agricultural area of Qinghai Province[J]. Qinghai Science and Technology, 2008, 14(6): 36−39.]

[3] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 3−12. [Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 3−12.]

[4] 周嵬, 张强, 康凤琴. 我国西北地区降雹气候特征及若干研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(9):1029 −1036. [Zhou Wei, Zhang Qiang, Kang Fengqin. Recent advancements of hail research in Northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(9): 1029 −1036.]

[5] Johns R H, Doswell III C A. Severe local storms forecasting[J]. Weather Forecast, 1992, 7: 588−612.

[6] 刘晓璐, 刘建西, 张世林, 等. 基于探空资料因子组合分析方法的冰雹预报[J]. 应用气象学报, 2014, 25(2): 168−175. [Liu Xiaolu, Liu Jianxi, Zhang Shilin, et al. Hail forecast based on factor combination analysis method and sounding data[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(2): 168−175.]

[7] 王艳兰, 王娟, 伍静, 等. 桂林市2019年"3.21"极端大风与"4.24"致灾冰雹过程特征对比分析[J]. 热带气象学报, 2021, 37(2): 175−785. [Wang Yanlan, Wang Juan, Wu Jing, et al. Comparative analysis of characteristics of "3.21" extreme gale and "4.24" hailstrom in Guilin in 2019[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2021, 37(2): 175−185.]

[8] 张腾飞, 段旭, 鲁亚斌, 等. 云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 531−538. [Zhang Tengfei, Duan Xu, Lu Yabin, et al. Circulation background for a severe convective hailstorm weather process in Yunnan and its dopplar radar echo features[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(3): 531−538.]

[9] 王培涛, 王凤娇, 张婷婷. 山东滨州市冰雹天气分型和预报方法研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 33−40. [Wang Peitao, Wang Fengjiao, Zhang Tingting. Study on classification of synoptic systems and forecasting method of hail in Binzhou Shandong Province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(3): 33−40.]

[10] 沈树勤, 顾锋峰. 降雹前地面要素场的合成分析和冰雹的临近预报[J]. 气象, 1988, 14(6): 5−8. [Shen Shuqin, Gu Fengfeng. A composite analysis of surface factors in advanced of hail shooting and the nowcasting of hail[J]. Meteorological Monthly, 1988, 14(6): 5−8.]

[11] 段艺萍, 刘寿东, 刘黎平, 等. 新一代天气雷达三维组网产品在人工防雹的应用[J]. 高原气象, 2014, 33(5): 1426−1439. [Duan Yiping, Liu Shoudong, Liu Liping, et al. Application of cinrad mosaic products on artificial hail suppression[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(5): 1426−1439.]

[12] 陶岚, 管理, 孙敏, 等. 双线偏振多普勒雷达对一次降雹超级单体发展减弱阶段的演变分析[J]. 气象科学, 2019, 39(5): 685−697. [Tao Lan, Guan Li, Sun Min, et al. Evolution analysis of a hail-producing supercell using dual polarization doppler radar[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(5): 685−697.]

[13] 吴剑坤, 俞小鼎. 强冰雹天气的多普勒天气雷达探测与预警技术综述[J]. 干旱气象, 2009, 27(3): 197−206. [Wu Jiankun, Yu Xiaoding. Review of detection and warning methods for sever hail events by doppler weather radars[J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27(3): 197−206.]

[14] 曹舒娅, 孙伟, 韦芬芬, 等. 双偏振雷达在江苏"7.6"降雹过程中的应用分析[J]. 大气科学学报, 2021, 44(4): 549−557. [Cao Shuya, Sun Wei, Wei Fenfen, et al. Study of "7.6" hail event in Jiangsu based on dual-polarization weather radar observations[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(4): 549−557.]

[15] 孙伟, 曹舒娅, 沈建. 基于多源探测资料的"4.12"非典型冰雹特征分析[J]. 热带气象学报, 2021, 37(2): 218−232. [Sun Wei, Cao Shuya, Shen Jian. Characteristic analysis of "4.12" atypical hail based on multi-source data[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2021, 37(2): 218−232.]

[16] 张芳, 虎文珺, 晁剑. 青海省东部农业区冰雹天气特征分析及预警指标研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(1): 63−71. [Zhang Fang, Hu Wenjun, Chao Jian. Analysis of hail weather characteristics and early warning indexes in agricultural regions in eastern Qinghai Province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(1): 63−71.]

[17] 朱平, 肖建设, 伏洋. 青藏高原东北部冰雹和雷雨预警的风暴单体识别特征对比分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 941−948. [Zhu Ping, Xiao Jianshe, Fu Yang. Analysis on identification characters of storm cells for early warning of hail and thunder storms in the Northeast Qinghai Tibetan Plateau[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 941−948.]

[18] 赵瑞金, 杨德保, 董保华, 等. 石家庄地区冰雹天气环境条件的多普勒天气雷达资料分析[J]. 气象科学, 2008, 28(6): 689−696. [Zhao Ruijin, Yang Debao, Dong Baohua, et al. The analysis of environment condition of hail in Shijiazhuang using doppler weather radar products[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2008, 28(6): 689−696.]

[19] 李嘉, 马中元, 郑媛媛, 等. 一次强飑线过程多尺度回波系统特征分析[J]. 气象科学, 2022, 42(5): 622−630. [Li Jia, Ma Zhongyuan, Zheng Yuanyuan, et al. Evolution of multi-scale echo system during a strong squall line process[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2022, 42(5): 622−630.]

[20] 范皓, 杨永胜, 段英, 等. 太行山东麓一次强对流冰雹云结构的观测分析[J]. 气象学报, 2019, 77(5): 823-834. [Fan Hao, Yang Yongsheng, Duan Ying, et al. An observational analysis of the cloud structure of a severe convective hailstorm over the eastern foothill of Taihang Mountain[J]. Acta Meteorological Sinica, 2019, 77(5): 823-834.]

[21] 龚佃利, 王洪, 许焕斌, 等. 2019年8月16日山东诸城一次罕见强雹暴结构和大雹形成的观测分析[J]. 气象学报, 2021, 79(4): 674-688. [Gong Dianli, Wang Hong, Xu Huanbin, et al. Observational analysis of a rare and severe hailstorm cloud structure and large hailstones formation on 16 August 2019 in Zhucheng, Shandong Province[J]. Acta Meteorological Sinica, 2021, 79(4): 674-688.]

[22] 蔡淼, 周毓荃, 蒋元华, 等. 一次超级单体雹暴观测分析和成雹区识别研究[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 845-860. [Cai Miao, Zhou Yuquan, Jiang Yuanhua, et al. Observations, analysis, and hail-forming area identification of a supercell hailstorm[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(5): 845-860.]

[23] 李红斌, 孙鸿雁, 程相坤, 等. 大连地区冰雹气候特征及防雹天气预警概念模型[J]. 高原气象, 2010, 29(6): 1565-1570. [Li Hongbin, Sun Hongyan, Cheng Xiangkun, et al. Climate characteristic of hail and conceptual model of hail suppression in Dalian region [J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(6): 1565-1570.]

[24] 张之贤, 张强, 陶际春. 边界层对青藏高原东北边坡地区一次冰雹天气影响的数值诊断分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 321-328. [Zhang Zhixian, Zhang Qiang, Tao Jichun. Diagnostic analysis of the effect of planet boundary layer on a hail event in the northeastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(2): 321-328.]

[25] 洪延超, 肖辉, 李宏宇, 等. 冰雹云中微物理过程研究[J]. 大气科学, 2002, 26(3): 421-432. [Hong Yanchao, Xiao Hui, Li Hongyu, et al. Studies on microphysical processes in hail cloud[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(3): 421-432.]

[26] 朱好奇, 平凡, 谭桂容, 等. 一次北京冰雹形成的数值模拟及微物理机制研究[J]. 大气科学. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2303.22213. [Zhu Haoqi, Ping Fan, Tan Guirong, et al. Numerical simulation and study on the microphysical mechanism of hail formation in Beijing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2303.22213.]

[27] 刘春文, 郭学良, 段玮, 等. 云南一次典型降雹过程的冰雹微物理形成机理数值模拟研究[J]. 大气科学, 2021, 45(5): 965-980. [Liu Chunwen, Guo Xueliang, Duan Wei, et al. Numerical simulation on the microphysical formation mechanism of a typical hailstorm process in Yunnan, southwestern China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(5): 965-980.]

[28] 张小娟, 陶玥, 刘国强, 等. 一次冰雹天气过程的云系发展演变及云物理特征研究[J]. 气象, 2019, 45(3): 415-425. [Zhang Xiaojuan, Tao Yue, Liu Guoqiang, et al. Study on the evolution of hailstorm and its cloud physical characteristics[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(3): 415-425.]

[29] 康凤琴, 张强, 马胜萍, 等. 青藏高原东北边缘冰雹形成机理[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 749-757. [Kang Fengqin, Zhang Qiang, Ma Shengping, et al. Mechanism of hail formation on the Northeast border of Qinghai-Xizang Plateau and its Neighbourhood[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(6): 749-757.]

[30] Kang Fengqin, Zhang Qiang, Lu Shihua. Validation and development of a new hailstone formation theory-numerical simulations of a strong hailstorm occurring over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112: 1-13.

[31] 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等. 基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J]. 气象, 2014, 40(2): 216-222. [Huang Zhiyong, Xu Guirong, Wang Xiaofang, et al. Analysis on two hailstorm events in Xianning based on observations of ground based microwave radiometer[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(2): 216-222.]

[32] 黄治勇, 周志敏, 徐桂荣, 等. 风廓线雷达和地基微波辐射计在冰雹天气监测中的应用[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 269-278. [Huang Zhiyong, Zhou Zhimin, Xu Guirong, et al. Monitoring application of hailstorm event with the observation of wind profile radar and ground-based microwave radiometer[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(1): 269-278.]

[33] 陶涛, 张立新, 桑建人, 等. 六盘山区一次非典型冰雹天气过程微物理量特征的分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 299-307. [Tao Tao, Zhang Lixin, Sang Jianren, et al. A case analysis of microphysical characteristics of atypical hail formation over Liupan Mountain, China[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 299-307.]

[34] 柯莉萍, 谷晓平, 张艳, 等. 贵州乌蒙山区雨滴谱特征及降水估测研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2021, 43(6): 1166-1175. [Ke Liping, Gu Xiaoping, Zhang Yan, et al. Characteristics of raindrop spectrum and precipitation estimation in Wumeng Mountain area, Guizhou Province[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2021, 43(6): 1166-1175.]

[35] 濮江平, 赵国强, 蔡定军, 等. Parsivel(R)激光降水粒子谱仪及其在气象领域的应用[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(2): 3-8. [Pu Jiangping, Zhao Guoqiang, Cai Dingjun, et al. Parsivel recipitation particle spectrometer and application meteorological realm[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2007, 30(2): 3-8.]

[36] 岳治国, 梁谷. 陕西渭北一次降雹过程的粒子谱特征分析[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1716-1724. [Yue Zhiguo, Liang Gu. Characteristics of precipitation particles in a hailstorm process in Weibei area of Shaanxi Province[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(6): 1716-1724.]

[37] 徐家骝. 冰雹微物理与成雹机制[M]. 北京: 农业出版社, 1979: 110. [Xu Jialiu. The Microphysics of Hail and the Mecha-Nism of Hail Formation[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1979: 110.]

[38] 李聪, 姜有山, 姜迪, 等.一次冰雹天气过程的多源资料观测分析[J]. 气象, 2017, 43(9): 1084-1094. [Li Cong, Jiang Youshan, Jiang Di, et al. Observation and analysis of a hailstorm event based on multi-source data[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(9): 1084-1094.]

Observational analysis of a hailstorm event in Northeast Qinghai

WANG Qihua[1], LIN Chunying[1], LIU Xiao[2], ZHANG Liyan[1], ZHAO Zhanxiu[3],
ZHANG Boyue[1], GONG Jing[1]

(1. Weather Modification Office of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China; 2. Shanxi Artificial Precipitation Enhancement and Lightning Protection Technical Center, Taiyuan 030032, Shanxi, China; 3. Haibei Meteorological Bureau, Haiyan 812200, Qinghai, China)

Abstract: The Northeast of Qinghai Province is the key area for crop production and but is highly susceptible to hail. Hail forecasting, early warning, and artificial anti-hail operations are crucial strategies for reducing hail disasters. Understanding the features of hail monitoring data is fundamental to improving hail forecasting capabilities and initiating timely performing hail suppression measures. The hailstorm occurrence on June 29, 2021, Northeast of Qinghai, was analyzed using Doppler radar data, raindrop spectrum data, and high and ground data. The results revealed extreme unstable atmosphere stratification due to cold advection transportation at the upper levels, coupled with obvious temperature increases on the ground in this region, which is the weather background of this hailstorm process. During the hailstorm, the average raindrop spectrum and velocity spectrum at Pingan Station exhibited multipeak distribution. Differences between the maximum diameter of the Pingan hailstorm observed artificially and the raindrop spectrometer were insignificant, indicating the raindrop spectrometer's efficacy in observing hail particles and determining the time of maximum hail occurrence. The developmental stages of the hail cloud were identified, encompassing occurrence, jump, hail formation, and extinction. There was an obvious “V” shaped inflow gap in the low-level radar reflectivity factor before the hail. In the mature stage, the hail cloud displayed a noticeable bounded weak echo area, with obvious southerly inflow in the middle and lower layers. The radial velocity map depicted a discernible “0 line” in the hail cloud, pointing vertically upward through the overhanging echo and bounded weak echo region, indicating the top of the hail cloud. The research results have important guiding significance for hail forecasting Northeast of Qinghai. Moreover, the characteristics of various elements preceding hail occurrence serve as important criteria for scientifically identifying sites and conducting timely and appropriate artificial hail suppression operations.

Keywords: hail; raindrop spectrum characteristics; echo characteristics; observation and analysis; Northeast of Qinghai